Resistivity of over-doped Bi-2212 under the magnetic field

弘前大·理工 臼井 友洋,藤原 大樹,足立 伸太郎,渡辺 孝夫 東北大·金研 西嵜 照和,小林 典男 東北大·WPI 山田 和芳 東北大·工 野地 尚,小池 洋二 T. Usui<sup>1</sup>, D. Fujiwara<sup>1</sup>, S. Adachi<sup>1</sup>, T. Watanabe<sup>1</sup>, T. Nishizaki<sup>2</sup>, N. Kobayashi<sup>2</sup>, K. Yamada<sup>3</sup>, T. Noji<sup>4</sup> and Y. Koike<sup>4</sup>
<sup>1</sup>Graduate School of Science and Technology, Hirosaki University, <sup>2</sup>Institute for Materials Research, Tohoku University, <sup>3</sup>World Primier International Reserch Center, Tohoku University, <sup>4</sup>Graduate School of Engineering, Tohoku University

1. はじめに

銅酸化物高温超伝導体では擬ギャップと呼ばれるエネ ルギーギャップが超伝導転移温度 T。よりもかなり高い温 度 T\*から開き始める。この擬ギャップと超伝導の関係は 未だに理解されておらず多くの研究が行われている。私 たちは、Bi-2212 単結晶で電気抵抗率測定を行い擬 ギャップ現象について研究している。具体的に電気抵抗 率における擬ギャップによる影響は面間抵抗率の上昇 (以下、up-turn)として見られ、T\*を見積もる事が出来る。 Bi-2212 では T\*はキャリアーであるホール濃度の増加に 従い減少し、過剰にホールをドープした試料では T\*は T。 と同じぐらいの温度になる。しかし、そのような試料は作製 が困難であるため過剰ドープのデータが不足している。

擬ギャップ現象の解釈には大きく二つある。一つは、擬 ギャップは超伝導の前駆現象という考え方。または、擬 ギャップは超伝導とは異なる秩序であるという考え方があ る。私たちは、特に過剰ドープのデータが擬ギャップ現象 を理解するために重要であると考えている。もし、過剰 ドープにおいて擬ギャップが超伝導揺らぎよりも低い温度 から始まれば前者の考え方が否定されると言える。

以前の報告では、様々なホール濃度の試料で磁場中 電気抵抗率測定を行い面内抵抗率では超伝導揺らぎの 開始温度  $T_{scf}$ を、面間抵抗率の up-turn から擬ギャップ開 始温度 T\*を見積もり比較した。結果は  $T_{scf}$ とT\*は異なり、 ホール濃度依存性も異なることが分かった。また、過剰 ドープの試料では T\*が  $T_{scf}$ よりも低温側にある事を示唆 するデータを得ている。しかし、過剰ドープの面内抵抗率 は十分なデータではなかった。[1]

今回の研究は擬ギャップと超伝導の関係を理解するために、過剰ドープの試料を作製し磁場中抵抗測定を行い T\*とT<sub>sef</sub>の関係をより詳しく調べた。

## 2. 実験

試料は Bi-2212 単結晶の育成を TSFZ 法で行い、その 後熱処理し酸素量を制御し過剰ドープの試料を作製

した。試料は、ホール濃度の小さい順から Slightly over (p=0.20), Over (p=0.22), Heavily over (p=0.23) と呼び比較していく。また、各試料のホール濃度 p は J. L. Tallon の経験式[2]より見積もった。試料の組 成・熱処理条件は Table 1 にまとめている。

測定は東北大学金属材料研究所の 20T 超伝導マグ ネットを使用し、各試料で磁場中面内抵抗率と面間抵 抗率の測定をそれぞれ行った。磁場の方向は結晶構造 の c 軸方向に平行に印加し、磁場の強さは最大 17.5T で測定している。

Sample	Nominal composition	Annealing conditions	
Slightly over	$Bi_{2.1}Sr_{1.9}CaCu_2O_{8^+\delta}$	500°C 150h 1atm	
Over	$Bi_{1.6}Pb_{0.4}Sr_2CaCu_2O_{8+\delta}$	400°C 50h 1atm	
Heavily over	$Bi_2Sr_2CaCu_2O_{8+\delta}$	400°C 30h 400atm	

Table 1 Sample specifications.

3. 結果と考察

3-1 磁場中面内抵抗率の結果

Fig.1(a),(b),(c)には Slightly over、Over、Heavily over の結果を示す。面内抵抗率転移には磁場の増加に従い、 明瞭な正の磁気抵抗が見られた。転移の様子は Slightly over, Over では電子状態の二次元性が強い場合に見ら れる超伝導揺らぎに由来するブロードな転移を示すのに 対して、Heavily over では比較的シャープな転移を示した。 このようなシャープな転移は、電子状態が Bi 系に比べて 三次元的なLa系のオーバードープ領域の磁場中面内抵 抗率測定[3][4]で見られる変化と良く似ている。



Fig.1 The magnetic fields dependence of in-plane resistivity of over-doped Bi-2212 single crystal.

次に、Fig.1(d)(e)は OT と 17.5T、Fig.1(f)は OT, IT, 17.5T の比較を転移温度付近の拡大図で示した。具体的 に Fig.1(d)のデータを見ると、OT では T<sub>c</sub>よりも高温側から 超伝導揺らぎにより抵抗率の減少が見られる。一方で、 17.5T では磁場によって超伝導揺らぎが抑えられる事で 正の磁気抵抗が約 109K から見えてくる。これより、超伝 導揺らぎの開始温度 T<sub>sef</sub> は T<sub>sef</sub>=109K と見積もることが出 来る。同様の考え方で Over T<sub>sef</sub>=84K, Heavily over T<sub>sef</sub>=75K という事が分かった。また、Heavily over では OT の実験値において転移温度付近でマイナーな超伝導相 による変化があった。そのため、磁場を印加しそのような 超伝導相が見えなくなった 1T と 17.5T の実験値で比較し T<sub>sef</sub>を見積もっている。

## 3-2 磁場中面間抵抗率の結果

Fig.2(a),(b),(c)は各 Slightly over, Over, Heavily over の 揺らぎに由来する結果を示す。面間抵抗率には擬ギャップが開く事でデー以上の結果よりタに見られる様な抵抗率の上昇(up-turn)が生じる。それ伝導揺らぎ開始温ぞれ 17.5T の実験値において up-turn の開始温度を T\*伝導揺らぎ開始温する。Over、Heavily over では 0T のデータに up-turn が見Table 2 にまとめる。

次に、Fig.1(d)(e)は 0T と 17.5T、Fig.1(f)は 0T, 1T, られ、それぞれ擬ギャップが開き始める温度 T\*を Slightly 5.5T の比較を転移温度付近の拡大図で示した。具体的 Fig.1(d)のデータを見ると、0T では T<sub>c</sub>よりも高温側から 伝導揺らぎにより抵抗率の減少が見られる。一方で、 5.5T では磁場によって超伝導揺らぎが抑えられる事で の磁気抵抗が約 109K から見えてくる。これより、超伝 揺らぎの開始温度 T<sub>sef</sub> = 109K と見積もることが出

> 次に、Fig.2(d)(e)は 0T と 17.5T、Fig.2(f)は 6T,17.5T の 比較を転移温度付近の拡大図で示した。面内抵抗率転 移では磁場の増加に従い正の磁気抵抗が見られたのに 対して、面間抵抗率では負の磁気抵抗が見られた。 Fig.2(d)(e)(f)より負の磁気抵抗の始まる温度はそれぞれ Slightly over は 105K、Over は 84K、Heavily over は 73K と見積もる事が出来る。また、これらの温度は面内抵抗率 で見られる正の磁気抵抗が始まる温度とほぼ一致する事 から、面間抵抗測定で見られる負の磁気抵抗は超伝導 揺らぎに由来する効果だと考えることが出来る。

> 以上の結果より分かった面内抵抗率から見積もった超 伝導揺らぎ開始温度  $T_{scf}\rho_{ab}$ 、面間抵抗率から得られた超 伝導揺らぎ開始温度  $T_{scf}\rho_c$ 、擬ギャップ開始温度 T\*を Table 2 にまとめる。



Fig.2 The magnetic fields dependence of out-of-plane resistivity of over-doped Bi-2212 single crystal.

## 3-3 考察

OverとHeavily over はホール濃度 p がほとんど変わら ないが、面内抵抗率転移の様子はかなり異なっていた。 この違いは電子状態の変化が磁束の運動に影響したた めだと考えられる。以前報告した、アンダードープ領域で の結果[4]や、今回の Over までのオーバードープ領域の 磁場中面内抵抗率転移は比較的ブロードな転移を示し

Sample	$T_{scf}\rho_{ab}$	$T_{scf}\rho_c$	T*
Slightly over	109K	105K	148K
Over	84K	84K	85K
Heavily over	71K	73K	62K

Table 2 The superconducting fluctuation temperature  $T_{scf}$  and the pseudogap temperature T\* of various samples.

磁場中面内抵抗率転移は比較的ブロードな転移を示し ている。これは、二次元性が強いため大きな超伝導揺ら ぎによって起こっていると考えられる。そのためBi-2212で はかなりオーバードープの試料まで電子状態は二次元的 になっていると考えることが出来る。一方で、今回の過剰 ドープにした Heavily over の磁場中抵抗率転移は6Tぐ らいまでブロードな転移をしており、それ以上ではシャー プな転移に変化していた。これより、過剰ドープ領域では 高磁場側から磁束のピン止めが起こりやすい電子状態に 変化していると考えられる。

また、このような磁場中面内抵抗率のシャープな転移 は擬ギャップが T<sub>sef</sub>以上で開くドーピングまで Bi-2212 で は見られない変化だった。今回の Heavily over の結果を 見てみると面間抵抗率では擬ギャップによる up-turn が 6T ほどから見られ、面内抵抗率では 6T ほどからシャープな 転移に変化している。擬ギャップが T<sub>sef</sub>以下で開く場合は、 擬ギャップが開く事で電子状態が三次元的になっている のかもしれない。

## 4. まとめ

今回の研究は、過剰にホールをドープした Bi-2212 にお ける擬ギャップ温度 T\*と超伝導揺らぎ開始温度 T<sub>sef</sub>の関 係を調べることを目的として行った。結果は、主に面内抵 抗率に見られる正の磁気抵抗から T<sub>sef</sub>、面間抵抗率の up-tum から T\*を見積もり比較したところ過剰にドーピング を行った試料では擬ギャップは超伝導揺らぎよりも低い温 度から始まることが分かった。また、磁場中面内抵抗率は 擬ギャップ温度 T\*と超伝導揺らぎ開始温度 T<sub>sef</sub>の関係が T\* > T<sub>sef</sub>ではブロードに転移し、T\* < T<sub>sef</sub>ではシャープな 転移になる事が分かった。

この結果は擬ギャップは超伝導と異なる秩序であること、 また過剰ドープでは強磁場下で擬ギャップが開き電子状 態が三次元的になっている事を示唆している。

参考文献

- [1] 村田康介、工藤広信、臼井友洋、櫛引治樹、 渡辺孝夫、工藤一貴、西嵜照和、小林典男、 山田和芳、野地尚、小池洋二:東北大学金属材料 研究所強磁場超伝導材料研究センター、平成 21 年 度年次報告書 pp 7-10
- [2] J. L. Tallon, J. R. Cooper, P. S. I. P. N. de Sliva, G. V. M. Williams and J. W. Loram, Phys. Rev. Lett, 75, 4114, (1995)
- [3] M. Suzuki and M. Hikita, Phys. Rev. B, 44, 249, (1991)
- [4] 足立匡、宮崎真史、佐藤秀孝、小池洋二、 西嵜照和、佐々木孝彦、小林典男:東北大学金属 材料研究所強磁場超伝導材料研究センター、平成 22 年度年次報告書 pp 15-18
- [5] 臼井友洋、工藤広信、足立伸太郎、渡辺孝夫、 西嵜照和、小林典男、工藤一貴、山田和芳、野地尚、 小池洋二:東北大学金属材料研究所強磁場超伝導 材料研究センター、平成 22 年度年次報告書 pp 22-24